



ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Al, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ СВЕРХЗВУКОВОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

В. Н. КОРЖИК, А. Л. БОРИСОВА, Г. Н. ГОРДАНЬ, Н. П. ЛЮТИК, А. А. ЧАЙКА, Т. В. КАЙДА
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью повышения эффективности применения метода сверхзвуковой электродуговой металлизации (ЭДМ) в рамках данной работы были проведены исследования структуры и фазового состава покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al. Представлены результаты исследования покрытий, полученных методом ЭДМ, с использованием обычной и модернизированной установки ЭМ-14, а также установки PLAZER15-SA для сверхзвукового электродугового напыления. Показано, что использование сверхзвуковых газовых струй при ЭДМ позволяет существенно улучшить качество покрытий: обеспечить более высокую степень однородности и мелкодисперсности структуры (толщина lamелей уменьшается от 10...30 до 5...10 мкм), снизить пористость в 3...5 раз, в 2...3 раза уменьшить содержание оксидов, на 30...50 % повысить твердость. Формирование при сверхзвуковой ЭДМ твердого раствора хрома и алюминия в железе с повышенным содержанием хрома является предпосылкой для обеспечения жаростойкости разработанных покрытий до 1350 °С, что позволяет существенно расширить масштабы применения этого метода при нанесении защитных покрытий. Библиогр. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, сверхзвуковой метод, покрытие, микроструктура, фазовый состав, микротвердость

К основным методам нанесения защитных и восстановительных покрытий, дающим наибольшую экономию металла в условиях массового производства, относятся газотермические методы напыления (ГТН), прежде всего газопламенный, плазменный, детонационный и электродуговая металлизация (ЭДМ). Среди указанных методов ЭДМ является наиболее простым, продуктивным и дешевым. Так, согласно имеющейся технико-экономической оценке, покрытия, получаемые методом ЭДМ, в 3...10 раз дешевле получаемых прочими газотермическими методами: плазменным, детонационным напылением и др. [1]. Ассортимент проволочных материалов для ГТН, составляющий проволоки из черных и цветных металлов сплошного сечения, ограничивал область применения ЭДМ. Использование для ЭДМ порошковых проволок позволило существенно расширить масштабы применения этого метода ЭДМ за счет формирования структуры с новыми физико-химическими свойствами, обеспечивающими их повышенную стойкость к износу и коррозии. Как, например, следует из работ [2, 3], использование порошковых проволок систем Fe–Cr–C и Fe–Cr–Al позволило в широких пределах регулировать химический и фазовый составы покрытий и, следовательно, их эксплуатационные свойства. Авторами этих работ установлено, что при дуговой металлизации матричной фазой покрытия является твердый рас-

твор хрома или хрома с алюминием в α - либо γ -Fe. В покрытиях из Fe–Cr преобладает γ -фаза, а в покрытии системы Fe–Cr–Al — α -фаза.

Сферу использования методов ГТН ограничивает не всегда достаточная прочность связи покрытия с основой, а также невысокая механическая прочность покрытия, причиной которых является недостаточное энерговложение в зону формирования соединения частиц с основой и между собой, что при малом времени протекания процесса твердофазного взаимодействия (10^{-3} ... 10^{-4} с), который контролирует образование сил сцепления покрытия с основой [4], ограничивается число атомов, участвующих в нем. В то же время реализация процесса ГТН на воздухе обуславливает образование оксидных пленок на напыляемых частицах и поверхности формирующегося покрытия, что ведет к существенному повышению энергии активации процесса взаимодействия и к охрупчиванию напыляемого материала. В связи с этим в настоящее время совершенствование методов ГТН осуществляется за счет применения сверхзвуковых газовых струй (скорости до 2...3 Маха) с повышением кинетической энергии напыляемых частиц [5].

На базе использования сверхзвуковых струй продуктов сгорания газообразного и жидкого топлива разработан способ высокоскоростного га-



Таблица 1. Технологические режимы напыления покрытий методом ЭДМ с применением порошковой проволоки диаметром 1,8 мм системы Fe–Cr–Al

| Тип установки | Напряжение, В | Сила тока, А | Расход воздуха, м ³ /ч | Расход пропана, м ³ /ч | Давление воздуха, МПа | Дистанция напыления, мм |
|--|---------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Обычное электродуговое напыление | | | | | | |
| Базовая установка ЭМ-14 | 32...34 | 200...250 | 120...130 | - | 0,6...0,7 | 150...180 |
| Модернизированное электродуговое напыление | | | | | | |
| Модернизированная установка ЭМ-14 | 32...34 | 200...250 | 120...130 | - | 0,6...0,7 | 150...180 |
| Сверхзвуковое электродуговое напыление | | | | | | |
| Установка PLAZER15-SA | 34...36 | 160...180 | 90 | 4,0 | 0,6 | 70...130 |

зопламенного напыления (HVOF) с созданием специализированного оборудования для его реализации [6]. В настоящее время технология HVOF получает все более широкое практическое применение в связи с возможностью получения покрытий с высокими показателями плотности и прочности сцепления их с основой.

Другое направление в развитии сверхзвуковых технологий ГТН, реализованное в совместных работах ИЭС им. Е. О. Патона и Института газа НАНУ, связано с разработкой и применением плазмотронов, использующих в качестве рабочего плазмообразующего газа продуктов сгорания смеси воздуха с горючим газом [7]. Исследование свойств покрытий, полученных таким способом, показало возможность повышения прочности сцепления покрытий (до 150 МПа), снижения их пористости и степени окисленности [7].

В развитие этого направления в ИЭС, совместно с ООО «Научно-технический центр ПЛАЗЕР» и ООО «ВИСП» разработана технология и создана установка для сверхзвукового электродугового напыления PLAZER15-SA [8, 9]. Технология сверхзвуковой ЭДМ преодолевает основные недостатки метода электродугового напыления, связанные с низким качеством покрытий. Установка обеспечивает формирование сверхзвуковой газовой струи. Сверхзвуковой поток продуктов сгорания пропано-воздушной смеси, направленный в зону дуги, диспергирует расплав и транспортирует распыленный металл к основе. При использовании установки PLAZER15-SA размер расплавленных частиц на 90 % находится в пре-

делах 30...80 мкм, которые при деформации на поверхности превращаются в диски толщиной 5...10 мкм. Струя продуктов сгорания практически не содержит кислород и защищает расплавленный металл от окисления в дуговой зоне. В процессе нанесения покрытия деталь нагревается не более чем до 150 °С. Это обеспечивает отсутствие деформации детали.

Целью настоящей работы является исследование особенностей структурно-фазового состояния покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al, полученных методом сверхзвуковой ЭДМ. Проведены сравнительные исследования покрытия из порошковой проволоки, полученного с использованием обычной базовой установки ЭМ-14; модернизированной базовой установки ЭМ-14 с применением вторичного воздушного потока и регулируемым углом раскрытия потока частиц и установки сверхзвуковой ЭДМ PLAZER15-SA.

Методика исследований и исходные материалы. Исследования структуры покрытий выполняли методами металлографии (микроскоп «Неофот-32»), рентгеноспектрального микроанализа (микроанализатор «САМЕВАХ»), рентгеноструктурного фазового анализа (дифрактометр ДРОН-УМ1, монохроматическое CuK_α -излучение). Пористость покрытий определяли на приборе OMNIMET, микротвердость образцов измеряли на микротвердомере фирмы «LECO» при нагрузке на индентор 0,25 Н.

В качестве материала для напыления использовали порошковую проволоку системы Fe–Cr–Al. Режимы напыления покрытий приведены в табл. 1.



Рис. 1. Микроструктура ($\times 50$) поперечного сечения проволоки (а) и микроструктура ($\times 100$) и состав наполнителя (б) (1 — 16,6 Fe; 82,8 Cr; 0,36 Al; 0,2 Mn; 2 — 0,36 Fe; 0,2 Cr; 99,67 Al; 0,07 Mn)

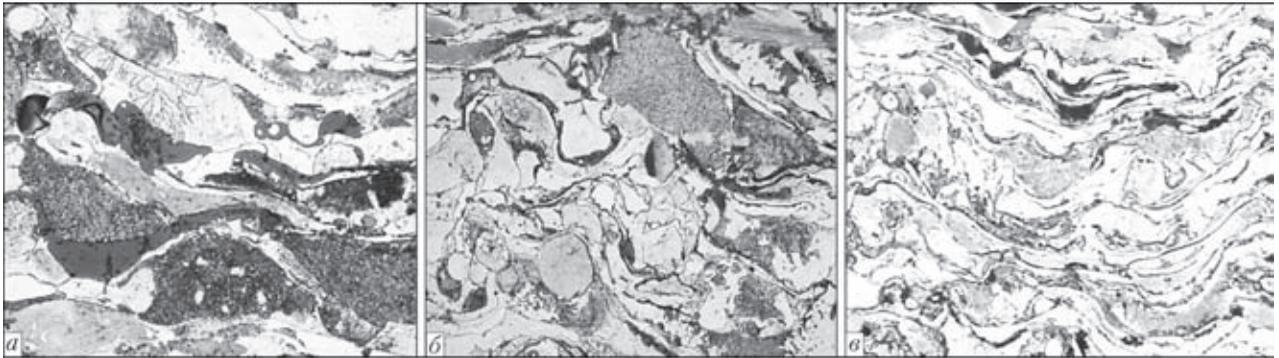


Рис. 2. Микроструктура ($\times 400$) покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al, полученных различными методами ЭДМ: *a* — обычное напыление; *b* — модернизированное; *v* — сверхзвуковое

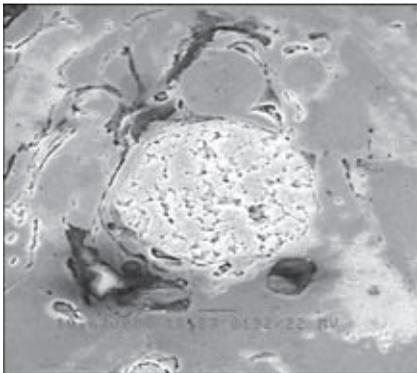


Рис. 3. Вид отдельной частицы в покрытии системы Fe–Cr–Al при ЭДМ ($\times 1000$)

Результаты работы. Исследовали химический состав и микроструктуру исходной порошковой проволоки и покрытий, полученных методом ЭДМ с использованием дозвуковых и сверхзвуковых струй. Порошковая проволока системы Fe–Cr–Al состоит из оболочки (стальная лента 08кп) и наполнителя (рис. 1, *a*). Состав оболочки порошковой проволоки, мас. %: 99,2Fe; 0,45Cr; 0,2 Al; 0,2Mn. Наполнитель проволоки состоит из смеси порошков FeCr и Al с размером частиц до 150 мкм. Микроструктура и состав наполнителя представлены на рис. 1, *б*.

Анализ результатов металлографических исследований покрытий показал, что микроструктура при дозвуковых скоростях истечения воздуха неоднородная, крупнозернистая, с большим количеством пор и оксидных включений. Материал покрытия перегрет и окислен, оксидные прослойки содержат 29...32 % кислорода, массовая доля кислорода в ламелях достигает 2,5 % (рис. 2, *a*). Также наблюдаются частицы сферической формы, которые из-за низкой скорости полета успели остыть до их столкновения с напыляемой поверхностью (рис. 3). Покрытие, полученное при использовании модернизированной базовой установки с применением допол-

Таблица 2. Фазовый состав покрытий, полученных при различных методах напыления, с использованием порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al

| Метод напыления | Фаза (<i>a</i> , нм) | Содержание, мас. % |
|---------------------------|--|--------------------|
| Обычное | Т. р. Cr и Al в α -Fe (0,2879) | 53,36 |
| | Т. р. Cr и Al в γ -Fe (0,3627) | 23,70 |
| | Al ₂ O ₃ (0,7916) | 22,93 |
| Обычное модернизированное | Т. р. Cr и Al в α -Fe (0,2875) | 57,08 |
| | Т. р. Cr и Al в γ_1 -Fe (0,3677) | 8,58 |
| | Т. р. Cr и Al в γ_2 -Fe (0,36305) | 34,34 |
| Сверхзвуковое | Т. р. Cr и Al в α -Fe (0,2870) | 22,39 |
| | Т. р. Cr и Al в γ_1 -Fe (0,3677) | 28,05 |
| | Т. р. Cr и Al в γ_2 -Fe (0,3633) | 49,56 |

нительного воздушного потока и регулируемым углом раскрытия потока частиц, менее окислено. В ламелях и оксидных прослойках массовая доля кислорода составляет соответственно 1,6...1,8 и 29...30 %. Толщина ламелей δ для этих покрытий такая же, как и при обычных дозвуковых режимах и равняется 10...30 мкм (рис. 2, *б*), пористость

Таблица 3. Состав покрытия системы Fe–Cr–Al при различных способах ЭДМ

| Участок покрытия | Содержание элементов в различных участках покрытий, мас. % | | | |
|--|--|-------------|-------------|-------------|
| | Al | Cr | Fe | O |
| Дозвуковое обычное напыление | | | | |
| Ламели серые | 5,0...5,2 | 14,0...15,0 | 78,0 | 1,9...2,5 |
| Ламели белые | 3,5...4,0 | 16,8...17,1 | 80,0 | 0 |
| Оксидные прослойки | 35,0...39,0 | 6,0...7,0 | 30,0 | 29,0...32,0 |
| Дозвуковое напыление (модernизированное) | | | | |
| Ламели серые | 6,0...6,2 | 15,0...15,4 | 75,0...76,0 | 1,6...1,8 |
| Ламели белые | 5,9 | 13,0...14,5 | 80,0 | 0 |
| Оксидные прослойки | 37,0...39,0 | 5,0...6,0 | 26,0...27,0 | 29,0...30,0 |
| Сверхзвуковое напыление | | | | |
| Ламели серые | 4,8...5,6 | 16,9...20,5 | 75,0...76,0 | 1,2...1,3 |
| Ламели белые | 6,0...6,2 | 20,0...20,5 | 75,0...73,0 | 0...0,4 |
| Оксидные прослойки | 18,0...23,0 | 10,6...14,0 | 50,0...55,0 | 11,5...17,0 |

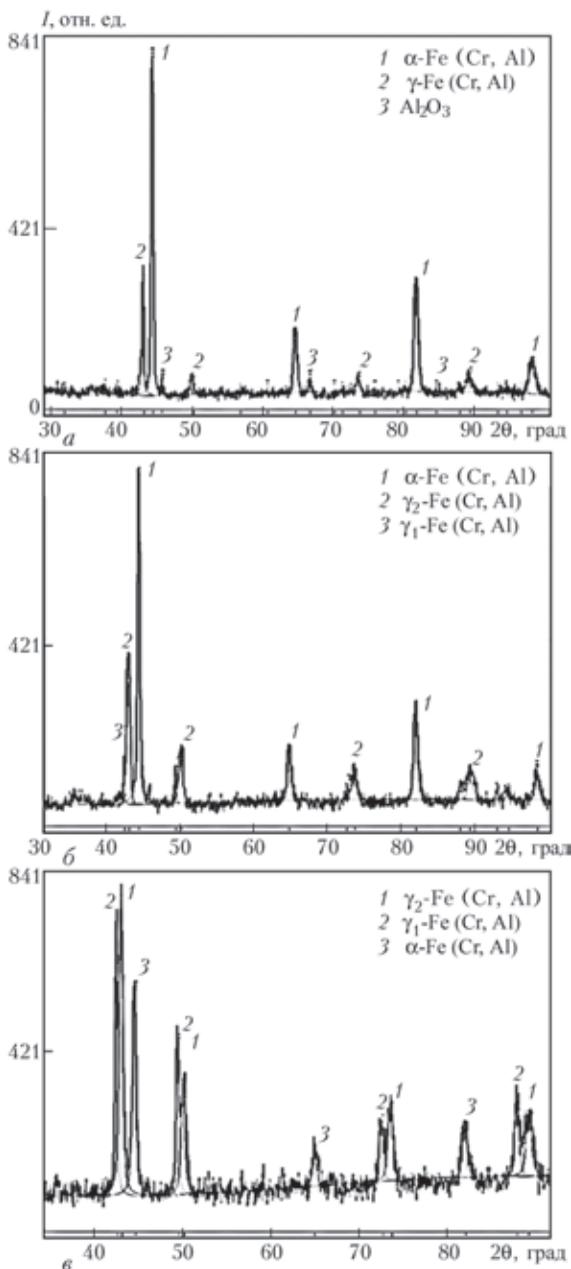


Рис. 4. Дифрактограммы ЭДМ покрытий Fe–Cr–Al, полученных различными методами: а — обычное напыление; б — модернизированное; в — сверхзвуковое

покрытий составляет 2...3 %. При переходе к сверхзвуковому воздушно-газовому методу ЭДМ, с увеличением скорости струи воздуха возрастает скорость полета частиц и микроструктура полученного покрытия претерпевает значительные изменения. Сочетание малого размера напыляемых частиц и их высоких скоростей в момент удара о поверхность основы приводит к высоким скоростям охлаждения их материала. В основном частицы имеют ламелеобразную форму и подвергаются значительной деформации. Включения глобулярных частиц не наблюдаются. Отмечаются тонкие оксидные прослойки. По всей толщине покрытия имеют однородную тонколамелярную структуру, что свидетельствует о стабильности

процесса. В покрытиях, нанесенных при сверхзвуковом воздушно-газовом напылении, значения δ находятся в интервале 5...10 мкм (рис. 2, в). Пористость структуры снижается и составляет 0,4 %.

Из анализа результатов рентгеноспектрального микроанализа и дифрактограмм покрытий (табл.2, рис. 4, 5) следует, что все исследуемые покрытия, полученные методами обычной дозвуковой ЭДМ, модернизированной и сверхзвуковой ЭДМ содержат твердый раствор алюминия и хрома в α -Fe (объемно-центрированная кубическая решетка с атомным радиусом $a = 0,2879$ нм), и твердые растворы алюминия и хрома в γ -Fe с гранецентрированной кубической решеткой и различным содержанием этих элементов. По данным рентгеноспектрального микроанализа при обычной дуговой и модернизированной металлизации в покрытиях преобладает твердый раствор хрома с алюминием в α -Fe, а в случае сверхзвуковой ЭДМ в покрытии основной фазой является γ -фаза. При сверхзвуковой ЭДМ и модернизированной ЭДМ фазовая составляющая γ -Fe с измененными параметрами существует в двух модификациях, а именно: γ_1 -Fe (Cr, Al) с $a = 0,3677$ нм и γ_2 -Fe (Cr, Al) с $a = 0,3633$ нм (рис. 4 б, в).

Разница в значениях параметров решетки γ_1 -Fe и γ_2 -Fe свидетельствует о разном содержании легирующих элементов. Распределение легирующих элементов исследовали на шлифах, примерно в центральной части покрытий, по глубине, перпендикулярно к границе раздела покрытий с основой. Содержание элементов в покрытии приведено в табл. 3 и на рис. 5. Установлено, что максимальная концентрация хрома в твердом растворе на основе железа в ламелях покрытий, полученных при обычном и модернизированном напылении, составляет 16,8...17,1 и 15,0...15,4 мас. % соответственно, в тех же условиях содержание алюминия составляет примерно от 4 до 6,2 %. Кроме этого, в процессе напыления алюминий взаимодействует с кислородом, образуются включения на основе Al_2O_3 , содержащие 35...39 мас. % алюминия и 29...32 мас. % кислорода.

При использовании сверхзвуковых струй турбулентный режим истечения струй переходит в ламинарный, в связи с чем уменьшается подмешивание воздуха и одновременно, за счет возрастания скорости газовой струи, увеличивается скорость частиц.

При сверхзвуковом напылении количество хрома и алюминия, растворенных в железе, возрастает, максимальная концентрация хрома в ламелях достигает 20,0...20,5 мас. %. Твердый раствор такой концентрации характеризуется большим сопротивлением окислению кислородом воздуха. Степень окисления напыленного покрытия зна-

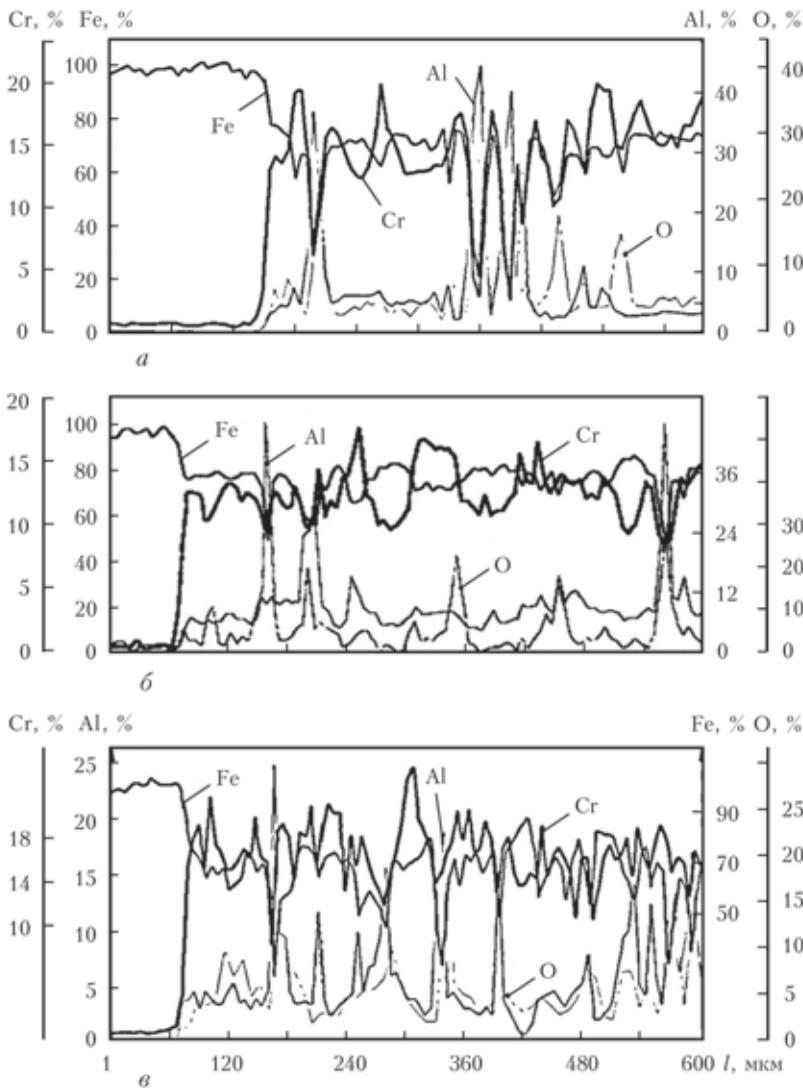


Рис. 5. Распределение легирующих элементов по толщине покрытий, полученных различными методами ЭДМ: а — обычное; б — модернизированное; в — сверхзвуковое

чительно уменьшается. В ламелях содержится около 1 % кислорода.

Если сопоставить полученные результаты рентгеноструктурного фазового анализа и рентгеноспектрального микроанализа покрытия, полученного при сверхзвуковой ЭДМ, с участком тройной диаграммы Fe–Cr–Al (рис. 6) по химическому составу, отвечающему составу исследуемого покрытия, то покрытие попадает в обозначенную высокотемпературную область I, которая обеспечивает жаростойкость до температуры 1350 °С [10].

Таким образом, при содержании в твердом растворе железа повышенного содержания хрома до 20,5 % и 6,2 % алюминия обеспечивается жаростойкость полученных при сверхзвуковой ЭДМ покрытий до температуры 1350 °С.

Сравнение значений микротвердости покрытий из порошковой проволоки, напыленных разными способами, показывает, что микротвердость покрытия, полученного при обычной ЭДМ, изменяется в пределах от 1930 до 4200 МПа, микротвердость покрытия, полученного на модернизированной установке, изменяется в пределах от 2540 до 5100 МПа. Максимальную микротвердость имеют сверхзвуковые покрытия, где диапазон значений находится в пределах 3900...6100 МПа, что может быть связано с увеличением содержания хрома в твердом растворе на основе железа.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что процесс электродуговой воздушно-газовой сверхзвуковой металлизации по сравнению с обычными методами ГТН позволяет получать покрытия с более однородной и мелкозернистой структурой. Толщина ламелей уменьшается в 2...3 раза, благодаря малому времени контакта расплавленных частиц с атмосферой и их высокой скорости в 2...3 раза уменьшается окисление напыляемого материала, пористость снижается в 3...5 раз. Микротвердость покрытия, полученного при сверхзвуковой ЭДМ, превышает, примерно, на 30...50 % микротвердость дозвуковых покрытий. Рентгеноспектральным микроана-

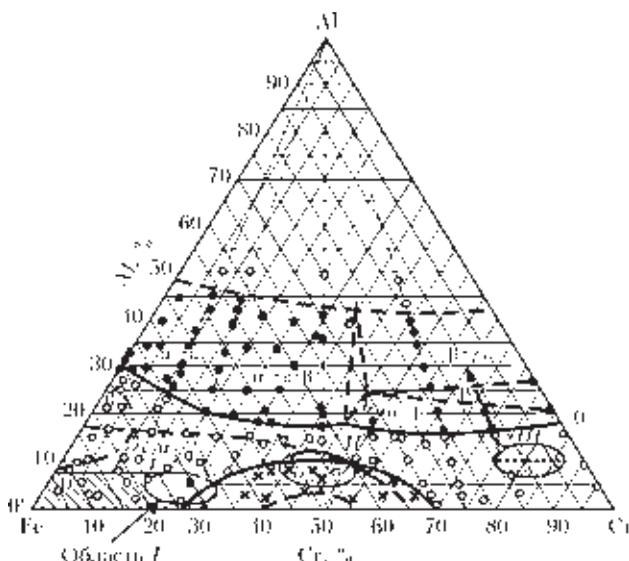


Рис. 6. Диаграмма фазового равновесия Fe–Cr–Al (обозначения см. в тексте)



лизом и рентгеноструктурным фазовым анализом установлено, что упрочнение покрытий обеспечивается формированием пересыщенного твердого раствора железа с повышенным содержанием хрома до 20,5 мас. % и алюминия до 6,2 мас. %. Порошковая проволока системы Fe–Cr–Al позволяет получать в покрытиях структуру с содержанием аустенита до 80 мас. %.

1. *Бороненков В. Н., Коробов Ю. С.* Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 268 с.
2. *Структура* и триботехнические характеристики покрытий, полученных электродуговой металлизацией с использованием порошковых проволок / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунык и др. // Автомат. сварка. – 2003. – № 8. – С. 13–17.
3. *Борисова А. Л., Кайда Т. В., Миц И. В.* Структура и свойства покрытий на основе феррохрома и феррохромалюминия, полученных электродуговой металлизацией из порошковых проволок // Там же. – 1995. – № 6. – С. 3–6.
4. *Кудинов В. В.* Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. – 184 с.
5. *Борисов Ю. С., Петров С. В.* Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автомат. сварка. – 1995. – № 1. – С. 41–44.
6. *Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (Обзор)* / В. А. Фролов, В. А. Поклад, Б. В. Рябенко, Д. В. Викторенков // Свароч. пр-во. – 2006. – № 11. – С. 38–47.
7. *Петров С. В., Карп И. Н.* Плазменное газоздушное напыление. – Киев: Наук. думка, 1993. – 495 с.
8. *Новая технология «Плазер»* реновации деталей для железных дорог / В. Н. Коржик, И. В. Кривцун, С. В. Петров, М. Ю. Харламов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 1. – С. 20–22.
9. *Петров С. В., Коржик В. Н.* Установка электродугового сверхзвукового напыления PLAZER15-SA // Сварщик. – 2011. – № 1. – С. 117–121.
10. *Гудремон Э.* Специальные стали. – М.: Металлургия, 1966. – 734 с.

Поступила в редакцию 04.07.2013



Российская академия наук
Национальный комитет по сварке
Корпорация «УВЗ»

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов» (ЦНИИМ)
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет (СПбГПУ)
Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона
СРО «Национальное Агентство предприятий – производителей сварной продукции»
Санкт-Петербургское Общество научно-технических знаний (СПбОНТЗ)



Уважаемые коллеги!
Приглашаем Вас в Санкт-Петербург
на III Международную научно-техническую конференцию
«Технологии и оборудование ЭЛС-2014»
(в рамках международной выставки Сварка-2014)

Время проведения: с 24 по 26 июня 2014 г
Место проведения: Санкт-Петербург, ЦНИИМ, ул. Парадная д. 8
Начало конференции в 10 часов.

Электронно-лучевая сварка – прогрессивный, наукоемкий и экологически чистый технологический процесс, обеспечивающий концентрированный ввод энергии в зону сварки, многократное уменьшение ширины шва и зоны термического влияния, увеличение глубины проплавления, высокую производительность, практически отсутствие сварочных деформаций по сравнению с дуговыми процессами и высокое качество металла шва.